

УДК 681.7.068.4

**В.П. Первадчук, А.Р. Давыдов**

Пермский национальный исследовательский  
политехнический университет, Пермь, Россия

## **ИМИТАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ ПРОЦЕССА ВЫТЯЖКИ КВАРЦЕВЫХ ОПТИЧЕСКИХ ВОЛОКОН**

Предлагается имитационная модель процесса вытяжки кварцевых оптических волокон и на основе модели анализируется управление процессом.

**Ключевые слова:** вытяжка оптических волокон, имитационная модель процесса, управление процессом вытяжки.

**V.P. Pervadchuk, A.R. Davydov**

Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation

## **SIMULATION MODEL OF QUARTZ OPTICAL FIBERS EXTRACTION PROCESS**

Simulation model of quartz optical fibers extraction process is offered in this article and managing of the process is analyzing, basing on this model.

**Keywords:** fiber optic extract, simulation model of a process, managing of extraction process.

В статье рассматриваются вопросы анализа и управления процессом вытяжки оптических волокон из кварцевой заготовки с использованием имитационной модели процесса. Под имитационной моделью процесса вытяжки будем понимать его компьютерную модель, позволяющую при заданных условиях получать численные реализации необходимых характеристик готового волокна, а также параметров технологического процесса. Объект моделирования будем рассматривать как систему, состоящую из заготовки волокна, печи, приемного устройства и собственно волокна. Соответственно, параметрами процесса будут геометрическая форма заготовки, скорость ее подачи в печь, скорость вытяжки и диаметр кварца готового волокна. Последний параметр является целевым, поскольку удержание диаметра в требуемом

диапазоне является необходимым условием получения качественного волокна [1].

Анализ реальных технологических процессов показывает, что изменение диаметра волокна обусловлено несколькими составляющими. Детерминированное изменение диаметра происходит вследствие контролируемого изменения геометрии заготовки, скорости ее подачи и скорости вытяжки волокна и может быть рассчитано на основании закона сохранения массы. Автокорреляционная составляющая изменения диаметра волокна отражает инерционность процесса, влияние его предыдущих значений. Статистический анализ показывает, что значимыми являются коэффициенты автокорреляции, рассчитанные со сдвигом в несколько десятков наблюдений. Стохастическая составляющая изменения диаметра кварца обусловлена наличием случайных, неконтролируемых причин: неоднородность свойств заготовки, колебания температуры печи, неконтролируемые колебания скорости подачи заготовки и скорости вытяжки. Эта составляющая может быть описана как система некоррелированных нормально распределенных величин со средним, равным нулю, и постоянной дисперсией, определенной при анализе данных реальных процессов.

Таким образом, принята следующая модель изменения диаметра волокна:

$$d_t = \sqrt{\frac{D_t^2 V_t}{v_t}} - \mu + \alpha_0 + \sum_{i=1}^k \alpha_i d_{t-i} + \varepsilon_t, \quad (1)$$

где  $d_t$  – величина диаметра кварца в момент времени  $t$ ;  $D_t$  – диаметр заготовки в момент времени  $t$ ;  $V_t$  – скорость подачи заготовки в момент времени  $t$ ;  $v_t$  – скорость вытяжки в момент времени  $t$ ;  $\mu$  – номинальное значение диаметра кварца;  $d_{t-i}$  – величина диаметра кварца в момент времени  $t-i$ ;  $\alpha_i$  – коэффициенты авторегрессии;  $k$  – порядок модели авторегрессии;  $\varepsilon_t$  – стохастическая составляющая изменения диаметра кварца.

Для имитации процесса вытяжки оптического волокна необходимо задать форму и размеры заготовки, скорость подачи заготовки и рассчитать скорость вытяжки, соответствующую номинальному диаметру кварца. Коэффициенты авторегрессии и параметры распределения стохастической составляющей рассчитываются по данным реаль-

ных выборок. Моделирование стохастической составляющей представляет собой задачу статистического моделирования случайной величины с заданным законом и параметрами распределения. Для моделирования нормального распределения используется «метод полярных координат» [2]. Моделирование процесса ведется по времени. С использованием взаимосвязи длины волокна со скоростью и временем вытяжки диаметр кварца пересчитывается на длину волокна. В результате для заданного набора входных параметров получаем значения диаметра кварца по длине волокна и скорости вытяжки во времени, соответствующие процессу вытяжки волокна. Различные прогоны модели соответствуют независимым повторениям процесса при заданных условиях. Адекватность результатов моделирования проверяется путем сравнения выборок модельных значений диаметра с реальными данными. Наблюдается хорошее соответствие по средним значениям дисперсии, а также по величинам коэффициентов автокорреляции [3].

В компьютерной программе реализовано управление процессом вытяжки с использованием принципа обратной связи. При отклонении значений диаметра от номинального значения на величину, больше допустимой, производится соответствующая корректировка скорости вытяжки. При этом возможно использование временной задержки реакции системы на изменение диаметра. В качестве управляющего контура выбран пропорционально-интегрально-дифференциальный регулятор (ПИД) [4], функцию управления которого  $u(t)$  можно представить в виде

$$u(t) = K_p \left( e(t) + K_{ip} \int_0^t e(\tau) d\tau + K_{dp} \frac{de(t)}{dt} \right), \quad (2)$$

где  $K_p$ ,  $K_{ip}$ ,  $K_{dp}$  – коэффициенты соответственно пропорционального, интегрального и дифференциального звеньев;  $e(t)$  – разность между номинальным и текущим значением диаметра. Поскольку диаметр волокна измеряется дискретно, функция также используется в дискретном виде:

$$U(n) = K_p E(n) + K_p K_{ip} T \sum_{k=0}^n E(k) + \frac{K_p K_{dp}}{T} (E(n) - E(n-1)), \quad (3)$$

где  $T$  – время дискретизации сигнала;  $E(n)$  – дискретная функция ошибки.

При программной реализации ПИД-регулятора использована рекуррентная формула расчета управляющей функции  $U(n)$ :

$$U(n) = U(n-1) + K_p(E(n) - E(n-1)) + K_p K_{ip} T E(n) + \frac{K_p K_{dp}}{T} (E(n) - 2E(n-1) + E(n-2)), \quad (4)$$

с начальными условиями:

$$U(0) = E(0) = E(-1) = 0.$$

Для эффективной работы регулятора должны быть определены оптимальные значения коэффициентов  $K_p$ ,  $K_{ip}$ ,  $K_{dp}$ . Для их нахождения используется следующий алгоритм:

- 1) приближенно определяются предельные значения коэффициентов, при которых регулирующая функция принимает большие значения и процесс переходит в неуправляемое состояние;
- 2) полученная область изменения значений коэффициентов разбивается сеткой с малым шагом;
- 3) с использованием значений коэффициентов в узловых точках моделируется процесс и рассчитывается дисперсия значений диаметра;
- 4) по сетке определяются значения коэффициентов, при которых дисперсия минимальна.

На основе имитационной модели проведен анализ эффективности работы контура управления технологического процесса вытяжки кварцевых оптических волокон. Были рассчитаны значения стандартных отклонений диаметра кварца десяти реальных процессов [5]. Затем для этих процессов были подобраны оптимальные значения параметров и наложено управление (4). В табл. 1 приведены значения стандартных отклонений диаметра кварца для реальных и соответствующих модельных процессов.

Из табл. 1 видно, что управление модельным процессом с оптимально подобранными коэффициентами не привело к значительному уменьшению стандартного отклонения диаметра. В некоторых случаях «улучшения» процесса и не потребовалось. Можно сделать вывод, что контур управления технологического процесса вытяжки оптических волокон настроен практически оптимально.

Таблица 1

Значения стандартных отклонений диаметра кварца для реальных процессов вытяжки и модельных процессов с оптимальными коэффициентами управления

Номер процесса	$K_p$	$K_{ip}$	$K_{dp}$	Стандартное отклонение реального процесса	Стандартное отклонение модельного процесса
1	0,0007	0,6	0	0,165	0,163
2	0,0002	1,8	1	0,201	0,199
3	0,0001	5,2	0	0,239	0,230
4	0	0	0	0,198	0,198
5	0,0007	1	0	0,165	0,156
6	0,0002	2	1	0,183	0,182
7	0,0001	3	0	0,181	0,180
8	0,0006	1	0	0,162	0,159
9	0,0001	2	0	0,221	0,220
10	0	0	0	0,194	0,194

Вместе с тем при появлении в процессе особых причин изменчивости управление может не удовлетворять требованиям качества изделия, а кроме того, способствовать ухудшению качества изделия. Низкочастотные возмущения сигнала быстро гасятся регулятором, но часть возмущений имеют период, существенно меньший относительно времени реакции управления. Анализ модельных результатов показывает, что если управление сигналом производится без его предварительной обработки, то из-за запаздывания управляющего воздействия амплитуда высокочастотных колебаний нарастает, как бы точно ни была настроена система ПИД-регулирования. Отнесем к неуправляемым те возмущения, частота которых  $\nu_0$  превышает значение

$$\nu_0 = \alpha_0 \frac{1}{T}, \quad (5)$$

где  $\alpha_0$  – константа, не превосходящая единицы;  $T$  – время запаздывания.

Отнесем к неуправляемым также те составляющие сигнала  $d_t$ , амплитуда отклонения которых меньше погрешности измерительного прибора диаметра  $E_0$ .

К повышению эффективности управления использовано несколько подходов. В первом случае применяется следующий алгоритм. Изменяемая величина диаметра волокна  $d_t$  представляется в виде ортогональной системы функций:

$$d_t = \sum_{n=0}^{\infty} C_n \varphi_n(t). \quad (6)$$

Это возможно, поскольку для любых моментов времени  $t_1$  и  $t_2$  выполняется условие

$$\int_{t_1}^{t_2} [d_t]^2 dt < \infty. \quad (7)$$

Коэффициенты ряда (6) определяются из следующих соотношений:

$$C_n = \frac{1}{\|\varphi_n\|^2} \int_{t_1}^{t_2} d_t \varphi_n(t) dt, \quad (8)$$

$$\|\varphi_n\|^2 = \int_{t_1}^{t_2} \varphi_n^2(t) dt. \quad (9)$$

Определим интервал времени, необходимый для идентификации сигнала  $d_t$ , с целью построения функции управления  $U(t)$ . Для этого воспользуемся анализом автокорреляционной составляющей временного ряда  $d_t$ . Автокорреляционный анализ показывает, что статистически значимые изменения значений автокорреляционной функции наблюдаются в диапазоне сдвига до 100 с. Этот период времени используется для преобразования измеряемой величины диаметра в виде (6).

Используем вейвлет-преобразование [6] для представления величины диаметра волокна в виде (6):

$$W_s(a, b) = \frac{1}{\sqrt{a}} \int_{+\infty}^{-\infty} d_t \cdot \psi\left(\frac{t-b}{a}\right) dt. \quad (10)$$

Здесь  $W_s(a, b)$  – масштабно временной спектр, являющийся функцией двух аргументов  $a$  и  $b$ . Параметр  $a$  соответствует периоду колебаний, а параметр  $b$  – смещению сигнала по оси времени. Функция  $\psi$  называется материнским вейвлетом. При вычислениях использован вейвлет Добеши [6].

Численный анализ показал, что для представления диаметра в виде (6) не требуется значительного числа слагаемых. Произведем декомпозицию сигнала  $d_t$  на 10 уровней:

$$d_t = a_{10} + \sum_{n=0}^{10} d_n(t). \quad (11)$$

На рис. 1 представлены графики составляющих сигнала  $d_i$ .

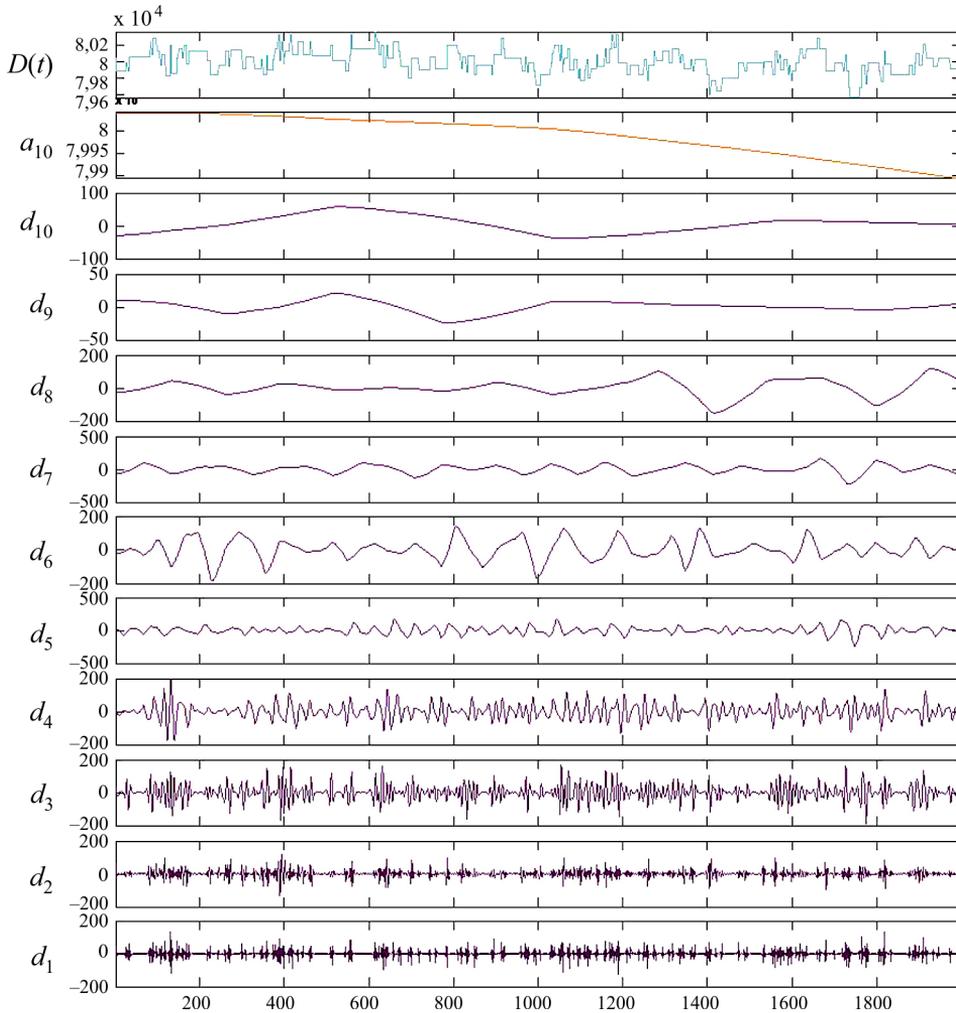


Рис. 1. Декомпозиция сигнала  $d_i$ .

Для каждого слагаемого ряда определяем амплитуду и частоту колебаний. В соответствии с описанными выше ограничениями на амплитуду и частоту сигнала из дальнейшего анализа исключены пять составляющих диаметра –  $d_1(t)$ – $d_5(t)$ . С использованием остальных функций  $d_6(t)$ – $d_{10}(t)$ ,  $a_{10}$  построим новый сигнал  $\tilde{D}(t)$ , на который и настраивается ПИД-регулятор:

$$\tilde{D}(t) = a_{10} + \sum_{n=6}^{10} d_n(t). \quad (12)$$

Модельные расчеты показывают, что при таком подходе использование управления приводит к улучшению характеристик сигнала на выходе.

Для фильтрации шумов при моделировании вытяжки также применяется метод Савицкого – Голея, реализованный в пакете MATLAB. Здесь используется аппроксимация последовательности исходных данных линейной комбинацией неких функций, при этом минимизируется сумма квадратов отклонений исходных данных от аппроксимирующих значений. Применительно к дискретной обработке сигнала аппроксимирующие полиномы в окрестности каждой точки строятся для выборки из исходного массива данных (окно аппроксимации). Ширина этого окна – число точек в выборке. Численно определен размер окна – 41 значение. Фильтр с такими параметрами имеет минимальную дисперсию при необходимом уровне фильтрации шума.

На рис. 2 представлен исходный сигнал – величина измеряемого диаметра кварца. Последовательность значений сигнала подается на сглаживающий фильтр. Фильтр с использованием предшествующих значений вычисляет аппроксимирующие значения сглаженного сигнала (рис. 3). Сглаженные значения диаметра подаются на ПИД-регулятор. Подчеркнем, что в этом случае производится управление исходным сигналом, а траектория управления выстраивается по обработанному фильтром сигналу. На рис. 4 приведен график значений сигнала на выходе.

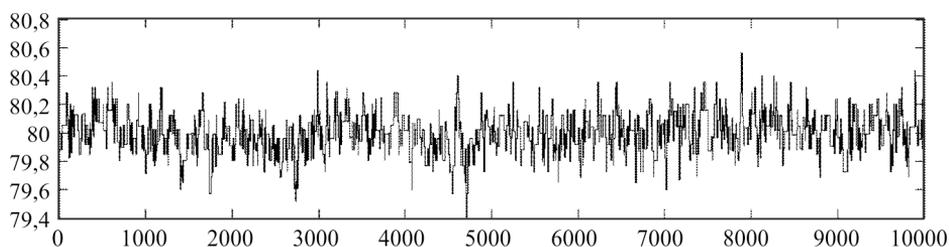


Рис. 2. Исходные значения диаметра кварца

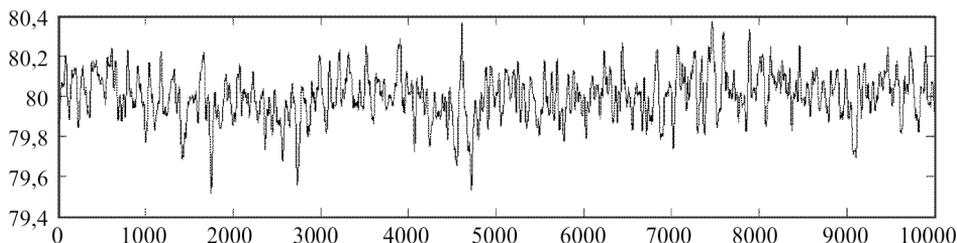


Рис. 3. Сигнал после предобработки

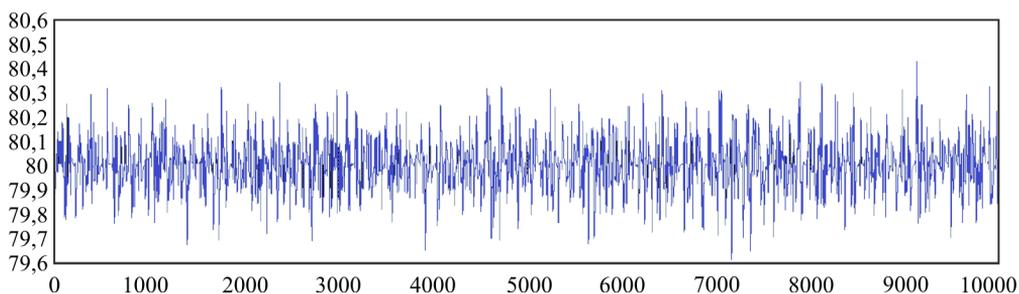


Рис. 4. Изменение диаметра кварца в результате действия управляющего контура

В табл. 2 представлены статистические параметры исходного и итоговых сигналов, полученных с использованием разных подходов к предварительной обработке измеряемых значений. Отметим, что управление процессом способствует улучшению характеристик изделия – среднее квадратическое отклонение и размах значений диаметра уменьшаются. Вместе с тем использование фильтра, реализованного в пакете MATLAB, по аналогичным характеристикам дает результаты более предпочтительные по сравнению с первым представленным алгоритмом.

Таблица 2

Статистики значений диаметра кварца при вытяжке волокна, полученные с использованием различных подходов к предварительной обработке сигнала

Статистики	Исходный сигнал	Итоговый сигнал (Алгоритм 1)	Итоговый сигнал (Алгоритм 2)
Среднее	80,06	80,14	80,1
Стандартное отклонение	0,1424	0,1221	0,1094
Минимальное значение	79,4	79,56	79,6
Максимальное значение	80,44	80,44	80,39
Размах значений	1,04	0,88	0,79

Предложенная имитационная модель процесса вытяжки оптических волокон позволяет без существенных затрат анализировать влияние изменений параметров процесса и производить оптимальную настройку параметров управляющего контура.

### Список литературы

1. Первадчук В.П., Крюков И.И., Давыдов А.Р. Имитационное моделирование процесса вытяжки кварцевых оптических волокон // Фотон-Экспресс. – 2011. – № 6. – С. 226–227.

2. Михайлов Г.А., Войтишек А.В. Численное статистическое моделирование. Методы Монте-Карло. – М.: Академия, 2006. – 367 с.

3. Давыдов А.Р., Баянов К.Н. Исследование процесса вытяжки оптических волокон на основе его имитационной модели // Глобальный научный потенциал. – 2013. – № 8. – С. 54–57.

4. Туманов М.П. Теория управления. Теория линейных систем автоматического управления: учеб. пособие. – М.: Изд-во МГИЭМ, 2005. – 82 с.

5. Давыдов А.Р., Баянов К.Н. Статистическое управление процессом вытяжки кварцевых оптических волокон на основе его имитационной модели // Перспективы науки. – 2013. – № 3. – С. 78–82.

6. Яковлев А.Н. Введение в вейвлет-преобразования: учеб. пособие. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2003. – 104 с.

### References

1. Pervadchuk V.P., Krukov I.I., Davydov A.R. Imitatsionnoe modelirovanie protsesssa vytyazhki kvartsevykh opticheskikh volokon [Simulation modeling of quartz optical fibers extraction process]. *Foton-ekspress*, 2011, no. 6, pp. 226-227.

2. Michailov G. A., Voytishek A.V. Chislennoe statisticheskoe modelirovanie. Methody Monte Karlo [Numerical statistical modeling. Methods of Monte Karlo]. Moscow, 2006, 367 p.

3. Davydov A.R., Baianov K.N. Issledovaniie protsesssa vytyazhki opticheskikh volokon na osnove iego imitatsionnoi modeli [The research of optical fibers extraction process, based on its simulation model]. *Globalnyi nauchnyi potentsial*, 2013, no.8, pp. 54-57.

4. Tumanov M.P. Teoriia upravleniia. Teoria lineinykh system avtomaticheskogo upravleniia [Theory of managing. Theory of automatic management lining system]. Moscow, 2005, 82 p.

5. Davydov A.R., Baianov K.N. Statistic management of quartz optical fibers extraction process, based on its simulation model [Statisticheskoe upravlenie protsesssom vytyazhki kvartsevykh opticheskikh volokon na osnove iego imitatsionnoi modeli]. *Perspektivy nauki*, 2013, no. 3, pp. 78-82.

6. Iakovlev A.N. Vvedenie v veivlet-preobrasovanie [Introduction in the wavelet transform]. Novosibirsk, 2003, 104 p.

Получено 15.10.2014